

覆冰工况下电力导线非对称疲劳失效的
数值模拟分析白茹¹ 蔡钢² 张晓敏² 陈文骐¹ 蒋渝¹

1. 四川大学材料科学与工程学院 成都 610000

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 成都 610072

摘要 2011年四川西昌地区月普一回线在覆冰气象条件下发生断线事故。基于现场调查资料, LGJ-630/45 钢芯铝绞线截面中的 12 根铝线为平齐的脆断断口, 其余均为典型韧断断口。本文基于有限元法的 ANSYS 计算平台, 从悬垂线和大挠度弯曲梁单元模型的静力学角度及梁单元模型的动力学角度分析了断线原因。研究表明: 事故现场采集的脆性平断断口系疲劳所致, 导线先因疲劳产生低应力脆断平断口, 引起有效截面减小, 继而发生应力过载断裂, 产生杯锥状韧性断口。事故发生原因为覆冰及脉动风使导线运行应力由 55.4 MPa 增至 97.9 MPa。在脉动风作用下, 导线发生一阶共振, 促使非对称疲劳的疲劳载荷应力均值增大, 大大降低了导线的疲劳寿命, 部分铝线发生断股, 引起导线有效截面减小, 使其运行应力超过导线破坏应力, 最终导致导线过载断线。

关键词 材料失效与保护, 导线断线, 低应力脆断, 过载断线, 非对称疲劳, 疲劳寿命

分类号 TG430

文章编号 1005-3093(2016)02-0149-07

Numerical Simulation Analysis of Asymmetric Fatigue
Failure for Iced Electric Power Transmission LineBAI Ru¹ CAI Gang² ZHANG Xiaomin² CHEN Wenqi¹ JIANG Yu^{1*}

1. College of Material Science and Engineering, Sichuan University Chengdu 610000, China

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China

Manuscript received July 13, 2015; in revised form September 17, 2015.

*To whom correspondence should be addressed, Tel: 13568899519, E-mail: JYscuniversity@163.com

ABSTRACT Accident of icing induced line break occurred for the electric power transmission line connecting Yucheng to Pugein the winter of 2011. Based on the observation and measured data, a broken section of the LGJ-630/45-type power line of stranded aluminum wires with steel core exhibited 12 broken aluminum wires with typical brittle fracture characteristics, but the rest wires were ductile fractured. On the basis of the theory of statics and dynamics of catenary beam element mode and large deflection bending beam element mode, the line breaking was analyzed by using ANSYS finite element method. Results show that the brittle fracture of 12 broken wires may be caused by fatigue, then the effective section of power line decreases, which further caused the rest wires to be broken due to overload. Icing and fluctuating wind lead the stress of the operating power line to be increased from 55.4 MPa to 97.9 MPa, which is the main cause to the line breaking. The power line resonate induced by the fluctuating wind, thus the mean stress of asymmetric fatigue increases, and the fatigue life of the line significant decreases. Corresponding to all the above considerations, the real stress of the operating line increases from 97.9 MPa to 275.2 MPa and thereby the ductile fracture occurs due to that the real stress exceeded the failure stress of 221 MPa of the operating line.

KEY WORDS materials failure and protection, lead break, brittle fracture, ductile fracture, asymmetric fatigue, fatigue life

1 普一回线覆冰断线事故

500 kV 月普双回线起于西昌月城站, 止于昭觉

2015年7月13日收到初稿; 2015年9月17日收到修改稿。

本文联系人: 蒋渝

DOI: 10.11901/1005.3093.2015.403

普提站, 线路途经西昌市、昭觉县、普格县。500 kV 月普一线全长 94.195 km, 投运于 2011 年 5 月 9 日; 月普二线全长 94.073 km, 投运于 2010 年 12 月 1 日。2011 年 12 月 9 日, 受低温冰冻天气影响, 月城普提 500 kV 双回线路发生倒塔断线事故。事故区段为

500 kV 月普一、二线 61#~66#区段, 地点位于西昌市安哈镇大菁乡螺髻山山脉, 海拔高度 2631.7 m 至 3030.9 m。该区段为同塔双回架设, 两个耐张段, 其中 61#~65#耐张段长 1122m, 65#~66#为孤立档, 档距为 732 m, 铁塔呼称高度为 47 m。该耐张段断面示意图及 62#杆塔上相和下相挂点处导线的断头示意图见图 1。

2 断线事故的失效断口分析

对现场取回的导线 LGJ-630/45 进行常规机电性能检测和振动疲劳性能试验^[1], 结果表明: 导线的相关性能符合要求, 不存在质量问题。从事故现场导线破断处的实际断口来看, 铝线断裂存在两种形式: 12 根铝单线是平齐的脆性断口, 呈现无定型的粗糙表面, 推断为疲劳断口; 其余单线或是断口周围有明显塑性变形, 断口外貌呈杯锥状, 或是整个断口平行于最大切应力, 与主应力成 45°角的剪切断口, 皆为典型韧断断口。铝线失效断口见图 2。

因架空绞线用硬铝线要求 Al 含量不小于 99.5% (质量分数), 属 FCC 结构, 为典型韧性材料, 在轴向应力作用下应为韧性断裂。韧断断口的经典失效型式为杯锥状形貌^[2], 但事故现场采集的失效照片为部分平断断口及部分韧断断口。为此, 本文详细分析了产生这种矛盾现象的原因。

3 导线断线的静力学分析

在基于有限元分析的 ANSYS 计算平台上, 以图 1 中的 61#-62#线路为研究对象, 采用质量单元 mass21 加载覆冰, 数值模拟导线在正常工况、覆冰、平均风^[3]以及覆冰与平均风共同作用下导线的安全

性。导线 LGJ-630/45 特性参数见表 1。H、L 和 D 分别为导线架线高度、档距和导线外径, m 为导线单位长度质量。

钢芯铝绞线由多股导线绞制而成, 钢芯和铝线



图 2 导线断口
Fig.2 Section photograph of power line

表 1 导线特性参数^[5]
Table 1 Characteristic parameters of power line

Parameters	Value
Type	LGJ-630/45
H/m	2700
L/m	280
D/m	0.0338
m/kg·km ⁻¹	2079.2
E/MPa	69000
$\alpha/^{\circ}\text{C}^{-1}$	11.8×10^{-6}
Operating stress/MPa	55.2
Failure stress/MPa	221

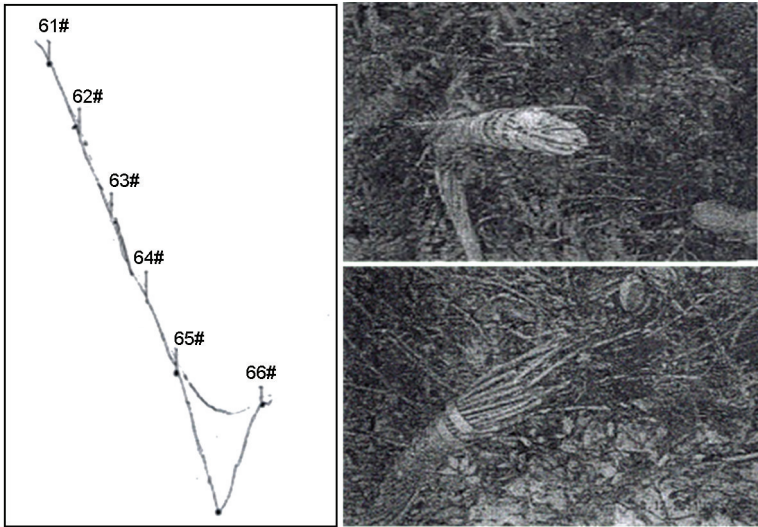


图 1 耐张段断面示意图及 62#杆塔上相和下相挂点处导线的断头示意图^[1]
Fig.1 Fracture photograph of tension resistance section and suspension points

chinaXiv:202303.10713v1

所分担的应力是不同的, 本文根据工程上的采用钢芯和铝线的综合弹性模量来计算整根导线的总体受力情况^[4]。考虑到绞线的弹性系数和线膨胀系数与单股线不同, 则钢芯铝绞线的综合弹性系数 E (N/mm^2) 和线膨胀系数 α 如下式:

$$E \approx \frac{A_s E_s + A_a E_a}{A_s + A_a} = \frac{\phi E_s + E_a}{1 + \phi} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{E_s \alpha_s + \phi E_a \alpha_a}{E_s + \phi E_a} \quad (2)$$

式中, A_s 、 A_a 分别为钢芯及铝层截面积; E_s 为钢线的弹性系数, 取 $200900 N/mm^2$; E_a 为铝线的弹性系数, 取 $60300 N/mm^2$; α_a 为铝的线膨胀系数, 取 $26 \times 10^{-6} ^\circ C^{-1}$; α_s 为钢线的线膨胀系数, 取 $11.5 \times 10^{-6} ^\circ C^{-1}$ ^[4]。 ϕ 为铝、钢截面比, 架空导线型号 LGJ-630/45, 截面比 $\phi = 0.07$ 。计算得绞线综合弹性系数 E 为 $69000 MPa$, 线膨胀系数 α 为 $11.8 \times 10^{-6} ^\circ C^{-1}$ 。

本文将线膨胀系数作为材料模型的基础数据, 通过 ANSYS 计算导线中由温度变化产生的应力。

3.1 导线在正常工况下静力分析

因架空输电线路的档距比架空线的截面尺寸大得多, 且架空线采用多股细金属绞线制成, 所以架空线的刚性主要受其悬索结构的应力刚性影响。为使问题简化, 假设架空线是没有刚性的柔性链, link180 单元符合悬垂线只承受拉力而不能承受弯矩的特点。因此采用 link180 单元模拟钢芯铝绞线, 数值模型建立的网格划分间距为 $0.2 m$, 根据建立的导线静力学模型计算结果如下: 导线在自重作用下水平运行应力为 $55.2 MPa$, 与事故调查分析报告^[1]中实测值相符; 此时悬挂点处导线张力 $55.4 MPa$ 低于理论值 $61.3 MPa$ 。可见在正常工况下, 导线处于安全运行状态。

3.2 覆冰与平均风单因素作用下静力分析

架空导线受到覆冰作用后, 严格地说, 载荷应力从悬链线的轴向应力过渡到大挠度弯曲的弯曲应力, 用 link180 单元模拟悬垂线法不能分析弯曲效应, 而 Beam189 单元能够承受弯矩, 适用于线性、大转角和非线性大应变的情况。为分析覆冰和风载导致的弯曲效应对导线张力的影响, 本文采用 Beam189 单元重新建立导线模型, 并分别进行 $0 \sim 60 mm$ 不同厚度的中空圆形覆冰下的静力分析, 将弯曲应力通过米塞斯准则等效成导线轴向应力, 并与 link180 单元模拟导线在覆冰作用下静力分析的结果进行对比。模拟计算的导线轴向运行应力变化见图 3。

再对悬链线轴向模型和大挠度弯曲的梁单元模

型进行风载作用下的静力分析, 根据风速 v 与风压 W 关系公式(式 3), 计算出 $0 \sim 70 m/s$ 不同平均风速作用于导线的风压。导线的风致应力还与风向有关, 架线地区为普格县, 风向以南偏东 22.5° 为主, 随季节变化小^[7]。将风压沿风向方向施加于导线上, 进行静力分析, 对比悬垂线模型和梁单元模型的计算结果, 见图 4。

$$W = 0.5 \times \rho \times V^2 \quad (3)$$

式中, 空气密度 ρ 取 $1.25 kg/m^3$ 。计算结果表明, Beam189 梁单元能够承受弯矩, 更准确地计算出覆冰、风速作用下导线的应力状态。所以本文以下的分析全部采用 Beam189 梁单元, 导线运行应力随覆冰厚度和风速的增大而增大。当覆冰厚度达到 $50 mm$ 或风速达到 $50 m/s$ 时, 导线应力达到破坏应力值 $221 MPa$, 导线发生过载断裂。

3.3 覆冰与平均风共同作用下的静力分析

以覆冰厚度为 X 轴, 平均风风速为 Y 轴, 模拟计算的导线运行应力值为 Z 轴, 对导线进行覆冰和平均风荷载共同作用下的静力计算, 导线水平运行应

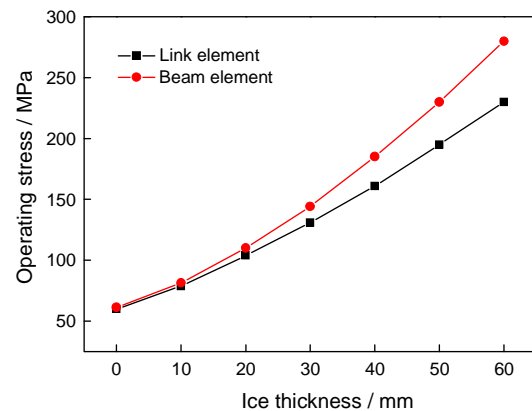


图3 导线运行应力随覆冰厚度变化曲线

Fig.3 The changing curve of operating stresses with ice thickness

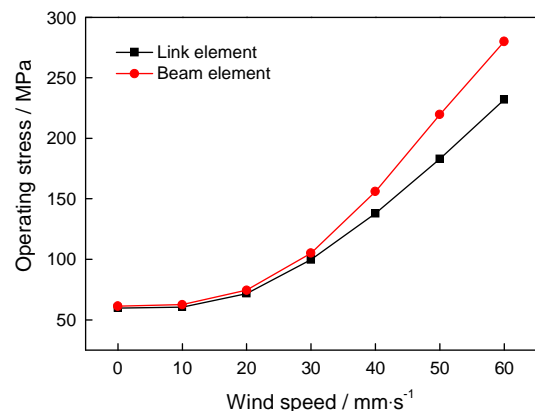


图4 导线运行应力随风速变化曲线

Fig.4 The changing curve of operating stresses with wind speed

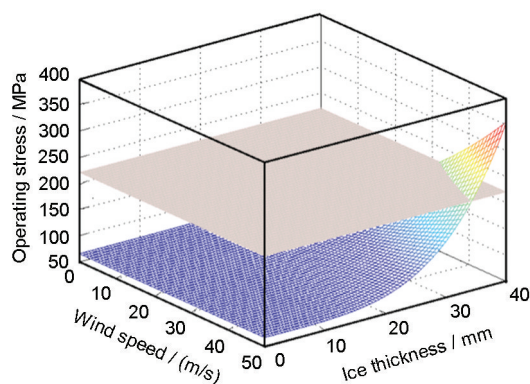


图5 导线运行应力在覆冰厚度和风速共同作用下的变化曲线

Fig.5 The changing curve of operating stresses with ice thickness and wind speed

力随覆冰厚度和风速大小的变化见图5。可知导线水平运行应力随覆冰厚度和平均风风速增大递增,当覆冰厚度达到32 mm且平均风风速达到35 m/s时,导线运行应力达到破坏应力221 MPa,导线因过载发生断裂。

在覆冰与平均风的联合作用下,导线因水平运行应力增大至破坏应力发生过载断裂,此时导线各股单线应均为韧断断口。然而断线事故现场采集的平齐断口为典型脆断断口。此外,断线事故发生区段为西昌地区,气象条件测量结果表明其年平均风速为2.2 m/s,最高风速不超过14 m/s^[6],不能达到断线风速35 m/s;依据DL/T 5154-2002《架空送电线路杆塔结构设计技术规定》,实际覆冰厚度不会超过10 mm^[8]。而模拟计算的覆冰过载断线的条件是覆冰厚度32 mm且平均风速为35 m/s,故不会由于纯粹覆冰、平均风或是覆冰与平均风共同作用造成导线断线。

上述计算结果与实测数据对比分析表明,自重、平均风、覆冰等在静载工况下均不能造成导线断裂。为此,需进一步考虑脉动风这一动载对导线动力响应的影响。

4 导线断线的动力学分析

4.1 导线模态分析

模态分析作为动力学分析的基础,可以计算模型在某边界条件下的固有频率及振型特征^[9],反应结构的动力学响应性能。本文根据有限元法建立导线的动力模型,利用ANSYS首先对模型进行模态分析,计算了导线的低阶固有频率及相应振型,其中前2阶固有频率分别为0.00799 Hz和0.02397 Hz,相应振型特征见图6。由模态分析结果可看出,外载频率极易达到导线的一阶与二阶固有频率,容易导致

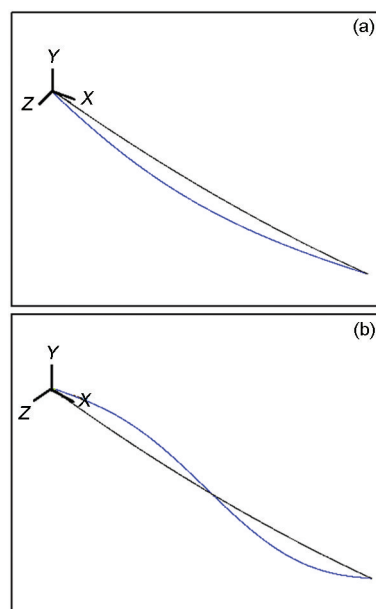


图6 导线1-2阶固有频率及振型: a一阶; b二阶

Fig.6 The inherent frequency and mode shape of power line: (a) the first-order modal; (b) the second-order modal

导线的共振,放大材料的变动载荷,从而增强材料的疲劳特征。

4.2 疲劳载荷分析

导线在脉动风作用下,处于舞动状态。本文研究脉动风荷载即疲劳载荷对导线疲劳的影响,通过计算导线在脉动风荷载作用下的疲劳损伤,进而估算其疲劳寿命。

西昌地区地面粗糙度系数0.16,地面阻力系数0.00215,属B类地形^[10]。据气象统计全年平均风速2.2 m/s。鉴于脉动风统计资料有限,本文基于MATLAB平台,采用Davenport谱作为模拟风速时程曲线的目标谱^[11,12],采用谐波叠加法模拟出2700 m海拔高程处的400s内风速时程曲线及脉动风的功率谱密度曲线见图7。脉动风频率主要分布在0.001 Hz-0.04 Hz。对比图6,不难发现脉动风的频率峰值与导线一阶固有频率接近,在此频率的脉动风荷载作用下,导线将发生一阶共振,振幅和应力势必大幅增加。

为了分析脉动风荷载对导线一阶共振过程中的导线运行应力的影响,本文根据伯努利方程(风速-风压关系)^[10],由图7脉动风风速进一步计算出导线动力模型中各节点的脉动风荷载作为导线动力学分析的疲劳载荷。

4.3 导线在疲劳载荷作用下共振分析

基于有限元法的ANSYS计算平台,对导线进行疲劳载荷下的动力响应分析。将导线结构离散化,在单元节点上作用模拟的与导线夹角77.5°^[7]方向的

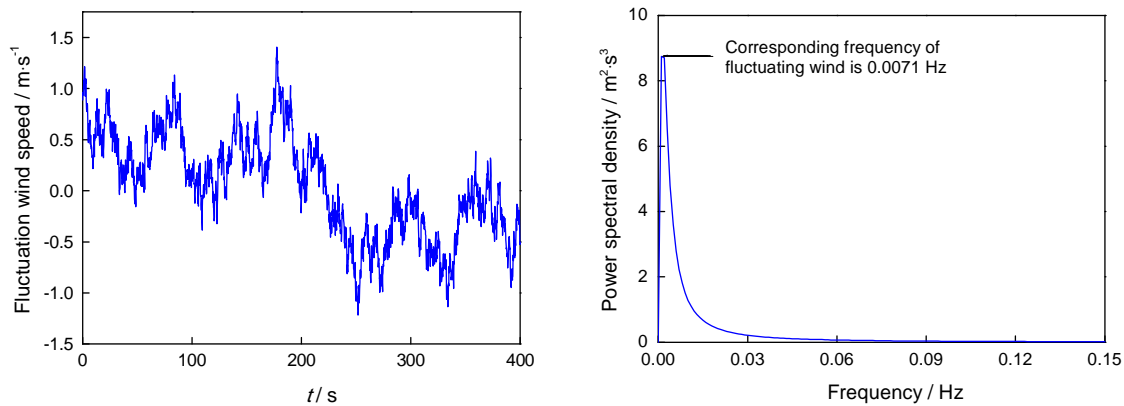


图7 脉动风风速时程曲线及脉动风功率谱密度曲线

Fig.7 Fluctuating wind speed time series and the power spectral density (PSD) curve of fluctuating wind

疲劳载荷,在导线动力学模型上,设置等效粘滞阻尼器,阻尼系数 C 为 0.0143,模拟电线在微风振动时的自阻尼消耗^[13]。通过在时域内直接求解运动微分方程的方法^[14, 15],得到导线的水平运行应力响应,见图8。

$$C = \frac{H}{4\pi} f^2 T^{-1.5} m^{1.5} l \times 10^{-3} \quad (4)$$

式中,钢芯铝绞线的滞后阻尼常数 H 为 5400 kg·m;由模态分析结果可知导线的振动频率 f 为 0.0079;导线张力 T 为 55.2 MPa; m 为导线单位长度质量; l 为架空导线长度。由式(4)计算得出阻尼系数 C 为 0.0174。

根据图3导线运行应力随覆冰厚度变化曲线,导线在 10mm 覆冰作用下静力响应值为 78.9 MPa;根据图8,脉动风荷载作用下,导线应力幅值增大至 97.9 MPa。不难看出导线在此工况下承受非对称疲劳载荷。不同应力比时的疲劳极限采用经验模型估算,铝材的非对称疲劳极限,一般不服从 Gerber 关系,偏于危险,采用 Goodman 模型比较合适^[16]。本文根据 Goodman 模型(式5)对非对称疲劳的修正理论^[17],估算不同应力比时的疲劳极限。Goodman 直线模型表达式:

$$\sigma_a = \sigma_{-1} [1 - (\frac{\sigma_m}{\sigma_b})] \quad (5)$$

式中, σ_m 为疲劳载荷谱的应力均值; σ_a 为疲劳载荷谱的应力幅值; σ_{-1} 为某一应力比时的疲劳极限; σ_b 为抗拉强度。

将平均应力修正理论应用于 ANSYS 的 Workbench 平台中,发现随疲劳载荷增大,疲劳寿命大幅降低。本文中导线在脉动风荷载作用下发生共振,振幅和应力大幅增加,由静力响应值 78.9 MPa 增大至 97.9 MPa,达到了破坏应力 221 MPa 的 44%。

再基于 Matlab 平台,对各等效疲劳载荷出现的

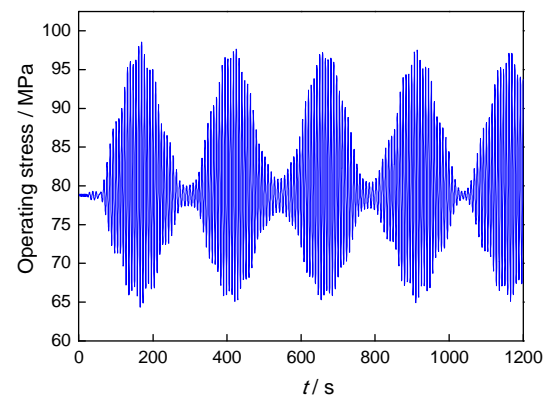


图8 导线的水平应力响应时程曲线

Fig.8 Time-history response curve of stress

次数采用雨流计数法^[18, 19]计数,即可得到导线在不同疲劳应力下的循环次数。当材料承受非对称循环应力时,各应力产生的损伤相互独立,每一循环使材料产生一定的损伤,当损失累积到临界值时,发生破坏。采用 Miner 累积损伤计算理论^[20, 21],计算导线疲劳损伤。

$$D = \sum_{i=1}^r \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

$$life = \frac{1}{D} \quad (7)$$

其中 n_i 为某应力水平下的循环数; N_i 为该应力水平下发生破坏时的循环数。当 $D=1$ 时,导线发生疲劳破坏。对不同运行应力下的导线进行循环次数的计算,结果见表2。

运用表2中计算数据及式6即 Miner 累积损伤公式^[22],计算出疲劳损伤 $D=0.00889$,按图7的分析时程 1200 s 计算,不难得出此工况下导线寿命仅为 10 d。

为此,在覆冰和脉动风的共同作用下,导线不对称疲劳载荷的应力均值增大。脉动风的外载频率峰值与导线基阶固有频率接近,在此频率风荷载作用

表2 运行应力和循环次数统计表
Table 2 Statistics of operating stress and cycle time

Operating stress /MPa	Cycle times /time	Limit cycle times /10 ⁵ time	Operating stress/MPa	Cycle times /time	Limit cycle times /10 ⁵ time
80	72	4550	90	44	7.62
82	68	3176	92	56	5.33
84	56	217	94	60	3.01
86	44	106	96	96	1.11
88	36	12	98	36	1.08

下,导线发生共振。共振促使导线不对称疲劳载荷的应力幅值大幅增大,基于 Goodman 模型对非对称疲劳的修正理论,非对称疲劳的疲劳载荷应力均值增大则疲劳寿命降低,因此部分铝线发生低应力疲劳断裂,形成了事故失效照片上的平断断口。继而部分断股引起导线有效截面减小,使导线的应力由 97.9 MPa 急剧增大到 275.2 MPa,远远大于导线的破坏应力 221 MPa,最终应力过载断裂,产生韧断断口。

5 结 论

1. 事故现场采集的脆性平断口系疲劳所致。导线因疲劳产生低应力脆断平断口,部分铝线断股引起有效截面减小,既而发生应力过载断裂,产生韧性杯锥状断口。

2. 事故发生原因为覆冰与脉动风使导线运行应力由 55.4 MPa 增至 97.9 MPa。在脉动风作用下,导线发生一阶共振,促使非对称疲劳的疲劳载荷应力均值增大,大大降低了导线的疲劳寿命,部分铝线发生断股,引起导线有效截面减小,使其运行应力增大至 275.2 MPa,超过导线破坏应力 221 MPa,最终导致导线的过载韧断。

3. 即使在覆冰载荷下,塔线设计的现行规范考虑的仅是覆冰放大的静载失效和风载的静载失效。本文旨在指出,覆冰放大的风载动载导致疲劳先期失效,而后引起有效截面减少的过载失效。

参 考 文 献

1 GB50545- 2010, Design specifications of overhead transmission line, *National Standards of People's Republic* (Beijing, Standards Press of China, 2010)
(GB50545-2010,《110 kV-750 kV 架空输电线路设计规范》,中华人民共和国国家标准(北京,中国标准出版社,2010))

2 ZHONG Qunpeng, ZHAO Zihua, *Fracture Study* (Beijing, High Education Press, 2006)p.65
(钟群鹏,赵子华,断口学(北京,高等教育出版社,2006)p.65)

3 ZHANG Xiangting, *Wind Effect on Structures* (Beijing, China Ar-

chitecture and Building Press, 2006)p.27
(张相庭,结构风工程(北京,中国建筑工业出版社,2006)p.27)

4 SHAO Tianxiao, *Wire and Mechanical Calculation of Overhead Transmission Lines* (Beijing, China Electric Power Press, 2003)p.13
(邵天晓,架空送电线路的电线力学计算(北京,中国电力出版社,2003)p.13)

5 The PRC standards of the power industry, *The Technical Specification for High-lifted Transmission Line Design DL/T 5154- 2002* (Beijing, Standards Press of China, 2002)
(中华人民共和国电力行业标准,架空送电线路杆塔结构设计技术规定 DL/T 5154-2002(北京,中国电力出版社,2002))

6 WANG Xiaogang, LILeyi, WANG Hailan, ZHOU Cunlong, HUANG Qingxue, Numerical Modeling for Roller Leveling Process of Bimetal-plate, *Chinese Journal of Materials Research*, **28** (4), 308(2014)
(王效岗,李乐毅,王海澜,周存龙,黄庆学,双金属复合板材辊式矫直的数值模型,材料研究学报, **28**(4), 308(2014))

7 MO Fang, YAN Huifen, ZHENG Zijun, XU Demei, CHEN Wenlong, Distribution features analysis of wind resource in liangshan, *Plateau and Mountain Meteorology Research*, **33**(2), 57(2013)
(莫芳,晏惠芬,郑自君,胥德梅,陈文龙,凉山州风资源分布特征分析,高原山地气象研究, **33**(2), 57(2013))

8 GB 500545- 2010, *National Standards of People's Republic* (Beijing, Standards Press of China, 2010)
(GB 500545-2010, 中华人民共和国国家标准(北京,中国标准出版社,2010))

9 XIAO Duoyan, TAN Weibin, ZHANG Wei, A practical method of real-time measurement for power system frequency, *Power System Protection and Control*, **42**(21), 29(2014)
(肖朵艳,谭卫斌,张维,一种使用的电力系统频率实时测量方法,电力系统保护与控制, **42**(21), 29(2014))

10 ZHANG Xiangting, *The Wind Pressure and Wind Vibration of Structure* (Shanghai, Tongji University Press, 1985)p.37
(张相庭,结构风压和风振计算(上海,同济大学出版社,1985) p.37)

11 ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi, Overview of the equivalent model research for wind farms, *Power System Protection and Control*, **43**(6), 138(2015)
(张元,郝丽丽,戴嘉祺,风电场等值建模研究综述,电力系统保护与控制, **43**(6), 138(2015))

12 R. P. Li, N. Zhou, W. H. Zhang, G. M. Mei, Fluctuating wind field

chinaXiv:202303.10713v1

- and wind-induced vibration response of catenary based on AR model, *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, **13**(4), 56 (2013)
- 13 KONG Deyi, Research on transmission line aeolian vibration and vibration control based on dynamic method, Doctoral Dissertation, Huazhong University of Science and Technology(2009)
(孔德怡, 基于动力学方法的特高压输电线微风振动研究基于动力学方法的特高压输电线微风振动研究, 博士论文, 华中科技大学(2009))
- 14 Y. Liu, Z. D. Qian, K. Q. Xia, Mechanical response of transmission lines based on sliding cable element, *Journal of Central South University*, **21**(8), 3370(2014)
- 15 HAN Yinquan, LIANG Shuguo, CHEN Yin, ZHANG Dongbing, Model experiment and analysis of dynamic tension of long span transmission line, *High Voltage Engineering*, **34**(5), 978(2008)
(韩银全, 梁枢果, 陈 寅, 张冬兵, 大跨越导线动张力计算和模型实验, *高电压技术*, **34**(5), 978(2008))
- 16 YAO Weixing, *Fatigue Life Prediction of Structure* (Beijing, National Defence Industry Press, 2003)p.28
(姚卫星, 结构疲劳寿命分析(北京, 国防工业出版社, 2003)p.28)
- 17 SHU Delin, *Mechanical Property of Engineering Materials* (Beijing, China Machine Press, 2009)p.79
(束德林, 工程材料力学性能(北京, 机械工业出版社, 2009)p.79)
- 18 A. K. Khosrovanch, N. E. Dowling, Fatigue loading history reconstruction based on the rain-flow technique, *International Journal of Fatigue*, **12**(2), 99(1990)
- 19 DONG Jie, CHEN Xuedong, FAN Zhichao, JIANG Huifeng, JIANG Heng, LU Shouxiang, High temperature fatigue creep behavior and life prediction of 316L stainless steel under 2-step load, *Chinese Journal of Material Research*, **23**(5), 541(2009)
(董 杰, 陈学东, 范志超, 江慧丰, 姜 恒, 陆守香, 316L 不锈钢的高温疲劳蠕变行为和寿命预测, *材料研究学报*, **23**(5), 541(2009))
- 20 W. L. Qu, J. W. Wang, Y. W. Tan, Z. Wang, Transmission tower's residual life prediction based on fatigue cumulative damage, *Journal of Wuhan University of Technology*, **29**(1), 149(2007)
(瞿伟廉, 王锦文, 谭亚伟, 汪 震, 基于疲劳累积损伤的输电塔结构剩余寿命估计, *武汉理工大学学报*, **29**(1), 149(2007))
- 21 L. L. Ban, W. J. Hui, Q. L. Yong, Y. Q. Wen, H. Dong, High cycle fatigue behavior of medium-carbon trip steel at different tensile strength levels, *Chinese Journal of Materials Research*, **22**(6), 629 (2008)
(班丽丽, 惠卫军, 雍岐龙, 翁宇庆, 董 瀚, 不同强度中碳 TRIP 钢的高周疲劳破坏行为, *材料研究学报*, **22**(6), 629(2008))
- 22 LI Shunming, *Mechanical Fatigue and Reliability Design* (Shanghai, Science Press, 2006)p.78
(李舜酩, 机械疲劳与可靠性设计(上海, 科学出版社, 2006)p.78)